

水分管理对水稻生长期 N_2O 排放的影响^①

李香兰^{1,4}, 徐 华^{1*}, 曹金留², 蔡祖聪¹, 八木一行³

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 江苏农林职业技术学院, 江苏句容 212400; 3 日本国立农业环境技术研究所, 日本筑波 305;

4 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 通过温室盆栽试验研究相同施肥条件下, 不同水分管理(持续淹水, 分蘖肥后提前烤田、正常烤田和推迟烤田)对水稻生长期 N_2O 排放的影响。结果表明, 整个水稻生长期 N_2O 的排放集中在施分蘖肥后的烤田期间及随后复水的 5~8 天内。在此期间各处理 N_2O 排放量占季节排放总量的 70.30%~94.26%; 烤田前淹水及后期干湿交替阶段有少量 N_2O 排放。对持续淹水处理而言, N_2O 的排放通量是正常烤田处理的 12.10%。提前烤田、正常烤田和推迟烤田的平均 N_2O 排放通量分别为 188.56、158.48 和 147.84 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 随着烤田开始时间的推迟, N_2O 排放量逐渐减少。

关键词: N_2O 排放; 烤田开始时间; 水稻生长期

中图分类号: S131; X511

N_2O 是一种受人类活动影响的重要的温室气体, 它还是平流层中导致臭氧层破坏的光化学反应的主要参与者。据统计, 大气 N_2O 浓度增加 1 倍, 平流层臭氧浓度将随之减少 10%, 到达地表的紫外辐射增加 20%, 从而导致人类皮肤癌的增加和其他健康问题^[1]。尽管早期的研究者曾一度认为水稻生长期没有 N_2O 的排放^[2-3], 但近十多年来的大量研究发现水稻田也能排放较高的 N_2O ^[4-6]。

硝化和反硝化是土壤中 N_2O 生成的两个主要的微生物过程。毫无疑问, N 肥的施用为水稻田 N_2O 的产生提供了可能, 但这种可能能否成为现实很大程度上取决于土壤水分状况和水分变化的频率^[4,7]。研究表明, 长期淹水条件下, 硝化过程受到限制, 反硝化过程以生成 N_2 为主, 所以 N_2O 排放量极少^[8]。水稻田几乎所有的 N_2O 排放皆发生在土面落干及随后短暂的复水期^[7,9]。水稻田 N_2O 这种源于土壤 N 素且其产生排放又具鲜明水分特征的特性提示我们, 能否通过调节施肥与随后烤田期间的时间间隔以减少 N_2O 的排放? 本文通过温室盆栽试验研究了水稻生长期追施分蘖肥后不同时间开始烤田对 N_2O 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤采自江苏省宜兴市大浦镇(31°17'N, 119°54'E)的水稻田。土壤全 C 和全 N 含量分别是 12.6 g/kg 和 1.3 g/kg, pH 6.23。试验为盆栽试验, 钵钵为圆柱形, 直径 25 cm, 高 35 cm, 每钵装土 16 kg。试验依照水稻生长期水分管理共设 4 个处理: ①持续淹水(水稻生长期自始至终保持 3~5 cm 水层); ②提前烤田(施分蘖肥后 8 天开始烤田); ③正常烤田(施分蘖肥后 15 天开始烤田, 与当地习惯一致); ④推迟烤田(施分蘖肥后 22 天开始烤田)。每个处理 3 个重复, 共 12 钵, 随机分布。

1.2 水肥管理

水稻于 6 月 11 日移栽, 10 月 28 日收获, 生长期为 139 天。水稻生长期水分管理采用传统的前期淹水、中期烤田、后期干湿交替(为方便比较, 统一设为 5 天落干/5 天淹水)的管理模式, 表 1 为处理方案及时间安排。各钵钵施肥情况相同, 其施肥量为 $\text{N } 270 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 并且 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 2:1:1$ 。其中基肥于水稻移栽前施入, 基肥施 N 量为设计施 N 量

①基金项目: 国家自然科学基金(40371068)和中国科学院全国优秀博士学位论文专项基金共同资助。

* 通讯作者(hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 李香兰(1980—), 女, 山东莱芜人, 博士研究生, 主要从事农田土壤温室气体及全球变化的研究。E-mail: xlli@issas.ac.cn

表 1 水稻生长期不同处理的水分管理

Table 1 Water management of different treatments in rice-growing season

处理	前期淹水 (月/日)	中期烤田及复水期		后期干湿交替 (月/日)
		烤田时间 (月/日)	复水时间 (月/日)	
提前烤田	6/11—7/4	7/5—7/19	7/20—8/17	8/18—10/28
正常烤田	6/11—7/10	7/12—7/23	7/24—8/17	8/18—10/28
推迟烤田	6/11—7/18	7/19—7/29	7/30—8/17	8/18—10/28
持续淹水	自始至终保持 3~5 cm 水层			

的 50%；分蘖肥和穗肥分别于 6 月 27 日和 8 月 7 日施入，施 N 量均为设计施 N 量的 25%。

1.3 采样和测定

采集气样时，将有机玻璃采气箱（30 cm × 30 cm × 100 cm）放置在 5 cm 深的水槽（与顶端下 5 cm 处盆钵外侧焊为一体）中。通过插进密封采样垫的两通针，用 18 ml 真空瓶采集箱内气体，每隔 10 min 采 1 次样，共 4 次。气体 N₂O 浓度由带有 ⁶³Ni 电子捕获检测器的气相色谱仪（岛津 GC-14 A）测定。N₂O 标准气体由日本国立农业环境技术研究所温室气体研究团队提供。

土壤溶液则由预先埋入盆钵的溶液采集器采集到专用真空瓶，其中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度由 Skalar 流动分析仪测定。土壤 Eh 通过插入盆钵土壤的 3 支铂电极（深度为 10 cm）用便携式土壤 Eh 计测定。

1.4 N₂O 排放通量计算

N₂O 排放通量计算公式如下：

$$F = \rho \times [(0.3 \times 0.3 \times 0.95 + 0.00049 \times h) / 0.049] \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

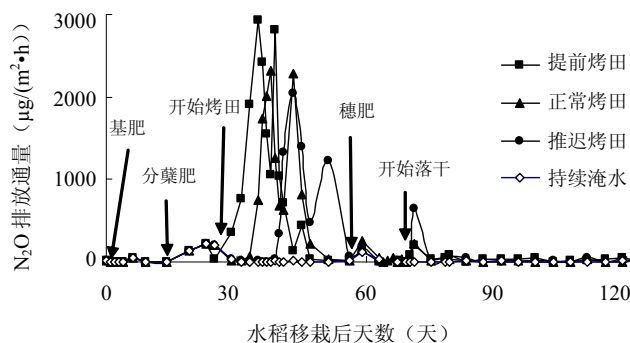
式中， F 为 N₂O 排放通量，(μg/(m²·h))； ρ 为标准状态下 N₂O 的密度 (1.25 kg/m³)； h 为盆钵顶部至盆钵内土面或水面的深度 (cm)； $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间密闭箱内 N₂O 浓度的变化量 (μg/(L·h))； T 为密闭箱内温度 (K)。N₂O 排放通量用每次观测的 3 个重复的平均值表示，N₂O 季节平均排放量则是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

2 结果与讨论

2.1 水稻生长期 N₂O 排放的季节变化

图 1 表示各处理水稻生长期 N₂O 排放的季节变化。从图中可知，对不同烤田处理，N₂O 排放主要集中在施分蘖肥后的烤田期间及随后复水的 5~8 天内；水稻生长前期持续淹水阶段只有少量 N₂O 排

放，施分蘖肥后 N₂O 排放略有增加；水稻生长后期仅在施穗肥后较短时间内 (15 天) 有 N₂O 排放，之后几乎无 N₂O 排放。持续淹水处理 N₂O 排放峰值远远低于烤田处理，但在两次追肥后能明显观察到 N₂O 排放。

图 1 各处理水稻生长期 N₂O 排放的季节变化Fig.1 Seasonal variations of N₂O flux of different treatments in rice-growing season

硝化和反硝化是土壤中 N₂O 生成的两个主要的微生物过程，水分是影响这些生物过程的最重要的因素之一^[10]。在追施分蘖肥后第 8、15、22 天先后开始对提前烤田、正常烤田、推迟烤田 3 个处理的土壤进行烤田。结果显示，每个烤田处理均有两个 N₂O 排放高峰，一个出现在烤田期间，随着烤田的开始，N₂O 大量排放，烤田结束时大幅度降低；另一个出现在烤田结束复水后，峰值相对较低。提前烤田在水稻移栽后 36 天就出现最大峰值 (2.93 mg/(m²·h))，移栽后 39 天出现第 2 个峰值 (2.82 mg/(m²·h))；正常烤田 N₂O 排放峰值分别是 2.38 mg/(m²·h) 和 1.82 mg/(m²·h)，出现在水稻移栽后 38 和 44 天；推迟烤田 N₂O 排放的峰值分别为 1.33 mg/(m²·h) 和 1.35 mg/(m²·h)，出现在水稻移栽后 42 和 51 天。

在适宜的水分条件下,水稻生长期 N_2O 排放主要受土壤中有效 N 含量的影响。施肥与随后烤田期间的时间间隔越短,作物对 N 肥的吸收相对较少,土壤中可用来转化为 N_2O 的 N 源越多, N 素转化为 N_2O 的几率越大。土壤中 N 素转化为 N_2O 的多少受水分条件的限制。对 3 个烤田处理而言,烤田期间土面落干大大改善土壤的供氧状况,有利于硝化反硝化过程同时进行,使 N_2O 成为这两个反应的主要产物,这些因素导致烤田后出现 N_2O 第 1 个排放高峰;落干后再淹水初期,土壤中较高的 NO_3^- 含量^[11]和淹水条件促进了反硝化反应的进行,而且 N_2O 还原酶的生成滞后于 NO_3^- 还原酶,滞后期随 NO_3^- 含量升高而延长^[12],因此在烤田后复水期间 3 个烤田处理均出现 N_2O 的第 2 个排放高峰。虽然持续淹水处理在两次施肥后 N_2O 的排放与烤田处理 N_2O 的排放相比甚微,但与自身水稻生长期其他时间较低或无 N_2O 排放相比,这两个排放峰值足以显示持续淹水条件下也有 N_2O 排放。这可能是由于土

壤是一个不均匀体,土粒中可以同时存在好氧微域和厌氧微域^[16],即使在淹水条件下(特别是施肥后土壤中存在大量 N 源时)也会出现 N_2O 的排放。此外,土壤类型也可能是影响持续淹水条件下 N_2O 排放的另一个因素。

2.2 N_2O 平均排放通量和不同水分管理阶段的分配

为进一步定量比较不同处理之间 N_2O 的排放差异,阐明水分管理对稻田 N_2O 排放的影响,将水稻生长季节分为烤田前淹水期、烤田及复水期和水稻生长后期 3 个阶段。表 2 显示各处理 N_2O 平均排放通量及不同水分管理阶段 N_2O 排放量占季节排放量的比例。由表 2 可知,对不同烤田处理,70.30% ~ 94.26% 的 N_2O 排放集中在烤田及随后复水期,且烤田开始越早,比例越大。不同烤田处理 N_2O 平均排放通量存在如下关系:提前烤田>正常烤田>推迟烤田。相同施肥条件下,提前烤田极大地促进了 N_2O 的排放。

表 2 N_2O 平均排放通量及不同水分管理阶段 N_2O 排放量占季节排放量的比例

Table 2 Mean N_2O flux and proportion of N_2O emission in different water-managing period to the total amount in rice-growing period

处理	N_2O 平均 排放通量 ($\mu g/(m^2 \cdot h)$)	烤田前淹水期		烤田及复水期		水稻生长后期	
		N_2O 排放量	占生长期	N_2O 排放量	占生长期比例	N_2O 排放量	占生长期
		(mg/m^2)	比例 (%)	(mg/m^2)	(%)	(mg/m^2)	比例 (%)
提前烤田	188.56	29.14	5.13	535.78	94.26	82.95	14.59
正常烤田	158.48	49.61	8.98	409.85	74.15	69.24	12.53
推迟烤田	158.48	52.85	10.34	359.26	70.30	81.09	15.87
持续淹水*	22.81	50.40	97.66	0.19	0.38	1.02	1.97

* 持续淹水处理对应的烤田时间与当地习惯一致。

对持续淹水处理,97.66%的 N_2O 排放集中在烤田前持续淹水阶段,水稻生长后期在施穗肥后只有微量 N_2O 排放。这是因为占施 N 量 75% 的肥料在烤田前施入,充足的 N 源为 N_2O 产生提供基础。但也有研究表明,稻田在持续淹水条件下几乎无 N_2O 的排放^[4,13-14]。由表 2 看出,持续淹水处理 N_2O 排放通量是正常烤田的 12.10%;不同烤田处理烤田前淹水期 N_2O 排放量占季节排放量的 5.13% ~ 10.34%,生长后期 N_2O 的排放量占季节排放量的 12.53% ~ 15.87%。可见,水稻生长前期短时间持续淹水排放的 N_2O 在量上可与生长后期较长时间内 N_2O 的排放量相当,说明本试验持续淹水条件下 N_2O 的排放不容忽视。

图 2 显示不同处理土壤中 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 的季节变化。由图 2 可知,烤田期间土壤中 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 的大量存在是 N_2O 集中排放的基础。各处理烤田前淹水阶段 NH_4^+-N 浓度较高,这为烤田开始后硝化反应产生 N_2O 提供基础。随着烤田的进行, NH_4^+-N 浓度逐渐降低,烤田结束时基本降为最低。对不同的烤田处理,烤田期间 $NO_3^- -N$ 含量较高,此时较高的 $NO_3^- -N$ 含量正是烤田期间土壤中硝化作用的结果,这为烤田结束后复水初期通过反硝化作用产生 N_2O 提供 N 源。随着作物对 N 肥的吸收和土壤中硝化和反硝化反应的进行,土壤中 N 源供应不足造成水稻生长后期几乎无 N_2O 排放(图 1、图 2)。

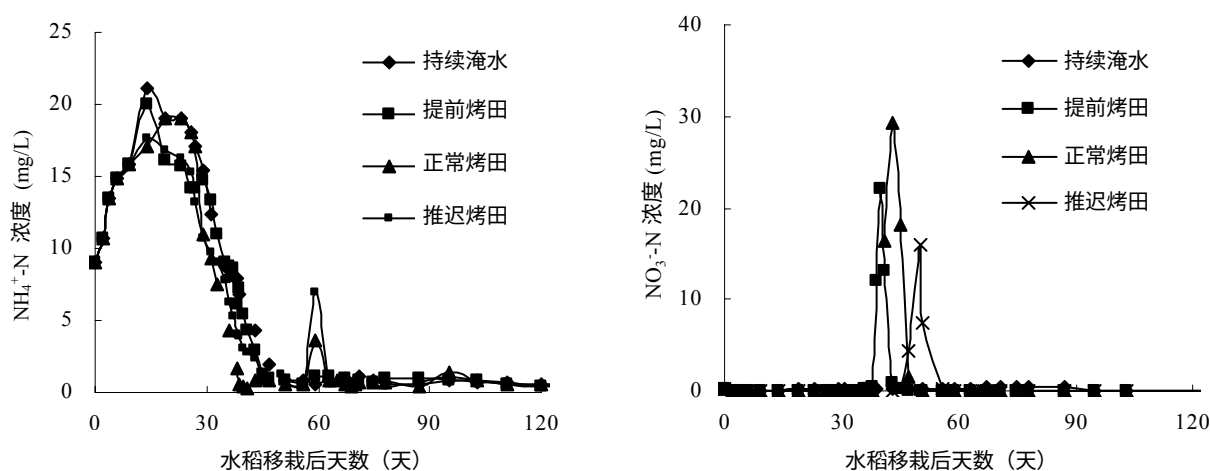


图 2 不同处理土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的季节变化

Fig. 2 Temporal variations of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations of different treatments in rice-growing season

2.3 土壤 Eh 对 N_2O 排放的影响

图 3 表示不同水分管理处理土壤 Eh 的季节变化。由图 3 可知,水稻移栽到烤田前的淹水阶段,土壤 Eh 呈下降趋势,在追施分蘖肥后开始升高,此时 N_2O 有一定排放(图 1)。烤田开始后,提前烤田、正常烤田和推迟烤田 3 个处理的 Eh 依次升高,此时 N_2O 大量排放(图 1)。持续淹水处理土壤 Eh 值一直处于较低状态。可见,土壤 Eh 受水分变化的制约,并影响 N_2O 的季节排放。对照图 1、图 3 可以看出,水稻生长期两次追肥都引起土壤 Eh 的小峰出现,相应地,不同处理在追肥后也出现 N_2O 的排放峰值。可能原因是,施肥引起水稻根系生长活跃,从而土壤松动改善了通气状况,有利于 N_2O 产生排放。

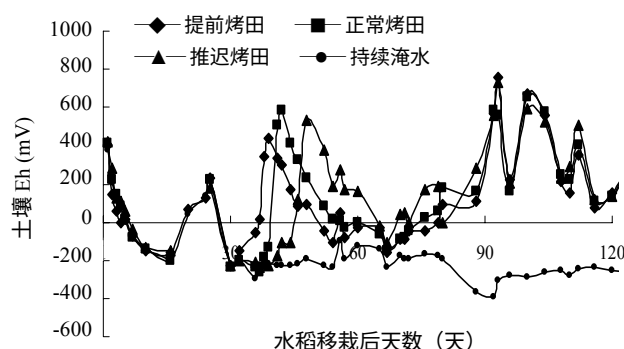


图 3 不同水分管理处理土壤 Eh 的季节变化

Fig. 3 Temporal variations of soil Eh of different water management in rice-growing season

研究认为, Eh 从 -250 到 +500 mV 范围内,水

稻排放 N_2O 有两个高峰,一个是在 400 mV,硝化作用是主要来源;另一个在 0 mV,反硝化作用是主要来源^[15]。虽然不同烤田处理水稻生长后期干湿交替阶段土壤 Eh 值高低起伏且居高不下,但水稻土几乎无 N_2O 排放。这是因为稻田土壤 N_2O 排放是温度、 O_2 和反应底物浓度以及传输过程等综合因素相互作用的结果,水稻生长后期土壤中 N 源消耗殆尽是造成此时无 N_2O 排放的直接原因(图 2)。

3 结论

受水分管理的影响,烤田处理 N_2O 的排放显著高于持续淹水处理,并且集中在烤田及随后的复水期,在此期间, N_2O 排放占水稻生长期 N_2O 排放总量的 70.30 ~ 94.26%。不同的烤田处理 N_2O 的排放通量出现如下规律:提前烤田 > 正常烤田 > 推迟烤田。N 肥的施用是 N_2O 产生的基础,水分是影响水稻生长期 N_2O 排放的主要因素。

持续淹水处理 N_2O 的季节排放量是正常烤田处理的 12.10%,施肥和土壤类型可能是引起此时 N_2O 排放的重要因素。

参考文献:

- [1] Cruzen PJ. Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide // Delwiche CC. Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide. New York: Wiley, 1991: 17-44
- [2] Buresh RJ, Austin ER. Direct measurement of dinitrogen and nitrous oxide flux inflooded rice fields. Soil Sci. Soc.

- A, J., 1998, 52: 681–687
- [3] Smith CJ, Brandon M, Patrick Jr WH. Nitrous oxide emission following urea-N fertilization of wetland rice. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1982, 28: 161–171
- [4] 徐华, 刑光熹, 蔡祖聪, 鹤田治雄. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N_2O 排放的影响. *应用生态学报*, 1999, 10 (2): 186–188
- [5] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 上官行健. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放. *大气科学*, 1997, 21 (2): 231–237
- [6] Cai ZC, Xing GX, Yan XY, Xu H, Tsuruta H, Yagi K, Ninami K. Methane and nitrous oxide from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil*, 1997, 196 (1): 7–14
- [7] 蔡祖聪, Mosier AR. 土壤水分状况对 CH_4 氧化, N_2O 和 CO_2 排放的影响. *土壤*, 1999, 6: 289–298
- [8] Granli T, Bockman OC. Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian J. Agri.Sci.*, 1994, 12 (Suppl.): 34–40
- [9] Xu H, Xing GX, Cai ZC, Tsuruta H. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 23–28
- [10] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响. *土壤与环境*, 2002, 11 (3): 294–298
- [11] Smith CJ, Patrick Jr WH. Nitrous oxide emission as affected by alternate anaerobic and aerobic conditions from soil suspensions enriched with ammonium sulfate. *Soil Biol. Biochem.*, 1983, 15: 693–696
- [12] Letey J, Valoras N, Hadas A, Focht DD. Effect of air-filled porosity, nitrate concentration, and time on the ratio of $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ evolution during denitrification. *J. Environ. Qual.*, 1980, 9: 227–231
- [13] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 郑循华, 王跃思. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23 (6): 758–764
- [14] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 邢光熹. 水分状况对水田土壤 N_2O 排放的影响. *土壤学报*, 2000, 37 (4): 482–489
- [15] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere*, 2005, 59: 1547–1556
- [16] Robertson GP, Tiedje JM. Nitrous oxide sources in aerobic soils: Nitrification, denitrification, and other biological process. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 187–193

Effect of Water Management on N_2O Emission in Rice-Growing Season

LI Xiang-lan^{1,4}, XU Hua¹, CAO Jin-liu², CAI Zu-cong¹, YAGI Kazuyuki³

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing, 210008, China;

2 Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China; 3 National Institute of Agro-Environmental

Sciences, Tsukuba 305, Japan; 4 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted in rice-growing season to investigate effect of water management on nitrous oxide (N_2O) emission. Four treatments were established in the experiment: continuous flooding (CF), keeping 3 to 5 cm water layer during the rice-growing season; early aeration (EA), 24 days after rice transplanting; normal aeration (NA), 30 days after rice transplanting; late aeration (LA), 38 days after rice transplanting. The results showed that two peaks of N_2O flux occurred in the mid-season aeration period and 5 to 8 days after re-flooding. The total N_2O emission of different treatments in these periods accounted for 70.30% ~ 94.26% of those emitted in the whole rice-growing season. As far as CF treatment was concerned, N_2O emission accounted for 12.10% of NA treatment. The average N_2O fluxes of EA, NA and LA treatments were 188.56, 158.48 and 147.84 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, respectively. So it can be easily found that the later soil aeration began, the lower N_2O emitted.

Key words: N_2O emission, Soil aeration timing, Rice-growing season